

文章编号: 1008-2786-(2015)2-129-12

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000018

## 初论堰塞湖溃坝沉积相特征

崔之久<sup>1,2</sup> 张梅<sup>3\*</sup> 崔鹏<sup>4</sup> 陈剑<sup>5</sup> 魏明建<sup>6</sup> 葛永刚<sup>4</sup> 陈艺鑫<sup>1</sup> 李川川<sup>1</sup>

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055;

3. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;

4. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 5. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083;

6. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘 要:** 堰塞湖溃坝类型包括冰川、冰碛、火山和多种块体地貌(滑坡、崩塌、泥石流等)过程,而溃坝堆积相的种种特点以后者所造成的最具代表性。堆积体平面展布范围大(几平方公里~几十平方公里),剖面规模也大(高几十米),层次(层理)和结构全剖面均一,无超大的砾石;微观上有部分泥石流堆积特点,显示是高密度流,搬运介质是水。堆积体很少细砂和粘土物质。在平面上可划分出:扇顶(上游)、扇中(中游)、扇缘(下游)等微相。

**关键词:** 溃坝堆积; 冰川-冰碛; 火山堆积; 块体运动堆积; 混杂堆积

**中图分类号:** P512.2, P931

**文献标志码:** A

在我国和全球各地堰塞湖有三大系统:一是在高山深谷地带,如以川西山地汶川、北川山区为代表,由崩塌、滑坡和泥石流等地貌过程形成的一系列堰塞湖;二是现代高山冰川带,如青藏高原南侧和西侧和南、北美高山等地,均有大量冰碛和冰川堰塞湖。它们的产生与冰川有关,而它们的溃决则与冰体消融、湖岸冰体崩塌和来自山体上部的基岩崩塌、冰崩而引起对冰湖稳定性的破坏,以及地震的触发有关<sup>[1-4]</sup>。第三是在火山分布地带,火山喷发的火山熔岩、火山碎屑岩以及火山泥流等造成的堰塞湖,但有溃决现象的很少。

冰川和冰碛堰塞湖、火山堰塞湖、与块体运动(滑坡、崩塌、泥石流等)堰塞湖在空间分布、地貌水文条件及溃坝堆积特征上都有很大差别。前者空间上多依据有冰川发育的极高山区,在喜马拉雅山和喀喇昆仑山,现代冰川都高于 5 000 m,古冰川发育区也都高于 4 000 m,溃坝堆积分布则 >3 000 m;也

多限于狭窄的沟谷丘陵区,溃决的洪水储量也不及块体运动堆积堰塞湖大。这导致一定距离内(几公里至十几公里)溃坝沉积物,除沿途有小规模扇形地堆积外,多沿狭窄沟道搬到山下较大宽谷处才开始堆积,但仍因空间有限,不可能形成像块体运动类堰塞湖那样宽阔的堆积空间,故没有条件形成多种沉积结构和构造,只发育与泥石流堆积类似的沉积特征。后者则发育在相对高度较大的(>1 000 m)峡谷——宽谷区。以川西山地为例,海拔在 1 500~3 000 m,或在北美大平原边缘山地<sup>[5-6]</sup>,而堆积区多在河谷盆地内,洪水和沉积物充填整个谷地,厚度可达几十至几百米,发育各种沉积构造等<sup>[7-9]</sup>。

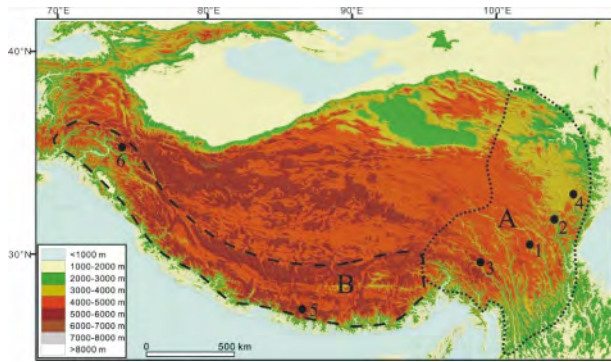
应该指出,火山堰塞湖在全球和中国都有一定数量的分布,但此类堰塞湖发生溃坝的比较少见,这主要是因为火山熔岩坝体十分坚固,可以在坝体上形成瀑布也不会溃决。如我国东北的镜泊湖,云南腾冲的大草湖。可以推测此类湖泊一旦溃决,其堆

收稿日期(Received date): 2013-12-19; 改回日期(Accepted): 2014-06-05。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(41230743)。[Key Program of National Natural Science Foundation of China (41230743).]

作者简介(Biography): 崔之久(1933-),男,教授,主要从事混杂堆积与第四纪冰川方面的研究。[Cui Zhijiu(1933-), male, professor, specialized in diamictite and quaternary glaciation.] E-mail: czj@urban.pku.edu.cn

\* 通信作者(Corresponding author): 张梅(1985-),女,博士,主要从事地貌学与第四纪环境研究。[Zhang Mei(1985-), female, Ph.D., major in study of geomorphology and quaternary environment.] E-mail: jluzhangmei@163.com



A: 块体运动(滑坡、崩塌、泥石流等)堰塞湖发育区(1. 四川彭县鸭子河上游; 2. 北川涪江上游; 3. 金沙江上游芒康雪隆囊; 4. 岷江上游(松潘以上)); B: 冰川、冰碛堰塞湖发育区(5. 喜马拉雅山区; 6. 喀喇昆仑山区)

图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

积物因所含熔岩碎块应很易识别。

从本研究项目工作区的分布图(图1)可以看出,1、2、3、4都分布在青藏高原东缘,切割深度超过1000 m以上的高山峡谷区,如岷江上游、龙门山地等,此区正是近年以山地剥蚀量来讨论地表均衡隆升的热点地区<sup>[10-11]</sup>。而在喜马拉雅山地,是冰川和冰碛堰塞湖分布最集中的地区,也是山地持续隆升保持现代冰川持续发育的代表性山地。而本文未涉及的相关其他地区如藏东南波密、涪江、怒江、雅砻江上游……整个青藏高原南缘和东缘(横断山地)都是抬升和下切最强烈的地区,可以说,以喜马拉雅山为代表的低纬山地和川西山地一系列不同类型的堰塞湖溃坝堆积都是山地抬升的产物,研究此类堆积物的地貌与沉积特征、分布时代,也是查明地区构造隆升强度、历史等的有效手段之一。

本研究涉及范围很广,将分别侧重介绍各个研究区某一方面的特点,如沉积剖面结构、堆积体空间分布以及2008年“5·12”汶川地震唐家山溃坝堆积现场等,最后构成一个有关溃坝堆积的全面系统认识,希望获得读者的批评指正<sup>[12]</sup>。

## 1 冰川与冰碛堰塞湖及其溃坝堆积

据王欣等<sup>[7]</sup>估算2000—2004年间,我国喜马拉雅山区共有冰川及冰碛堰塞湖143个,其中,溃决概率为“非常高”(44个)和“高”(47个)的共有91个。另在全球有记录的冰湖溃决灾害中,15次有12次发生在中国境内。溃决方式包括冰崩、冰滑坡、冰

湖土石岸崩塌、冰湖漫顶溢流、地震以及坝内死冰融化出现管涌溃决等。类似的冰湖溃决,所造成的洪水和泥石流在日喀则、江孜、亚东曾造成重大灾害。据统计,1935—1982年喜马拉雅山中段有11次冰湖溃决灾害,有9次曾派生泥石流危害沿途生产、生活设施,而溃决原因大多是冰碛阻塞湖溃坝所致<sup>[4,8]</sup>。Carson<sup>[1]</sup>曾描述约在450 a前的一次冰湖溃决中,波克拉河上游河谷被埋在50~60 m厚的泥石流堆积之下。

另据徐道明和冯清华研究<sup>[8]</sup>,我国喜马拉雅山和喀喇昆仑山区是全球冰湖溃决高发区,前者以冰碛堰塞湖居多,后者则常见冰川堰塞湖的报道。喜马拉雅山冰湖溃决的总水量通常介于 $10 \sim 20 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。由于该区槽谷内冰碛物、崩塌及坡积物发育,溃决洪水常造成大规模溃坝和泥石流堆积,灾害的影响范围甚至可达到数百千米。

1981年喜马拉雅山南坡波曲河流域章藏布沟源头的冰川终碛堰塞湖发生溃决,并在沿途连带造成一系列崩塌、滑坡等次生灾害,其影响一直延伸到50 km外的尼泊尔境内的逊科西水电站。此次溃决洪水比波曲河正常的多年平均最大洪峰流量高16倍,导致溃坝体物质和沿途坡脚河槽物质产生泥石流,并在谷口形成巨大的堆积体。此次洪水的流体性质相当于两相流的泥石流性质,有层流特性<sup>[8]</sup>。这是冰川湖泊溃决后溃决洪水被严格束缚于深深的峡谷中,它不能像在宽广河谷中可以展开或得到稀释,如同四川唐家山溃坝堆积那样。

章藏布沟位于喜马拉雅山希夏邦马峰东南坡章藏布冰川末端,湖面海拔为4665 m,冰川湖下游端冰川终碛堤高出湖面35~40 m,溃决前一个月当地牧民发现终碛堤下方有一直径1~2 m的管涌。此次溃决洪水平均水深32 m,并在冰碛中造成深50 m,底宽40~60 m的冲沟,在沟口下形成扇形地。据估算,最大溃决流量达 $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ ,出现在溃坝后23 min,主要洪峰过程约60 min,溃决水体总量 $1.9 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,约有 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 混杂堆积物参与溃坝搬运和堆积过程。据徐道明和冯清华观测<sup>[8]</sup>,部分巨大的冰川漂砾在台地下部产生堆积,形成扇形地,泥石流主体进入主沟后一直冲到波曲河对岸30 m的高台地上,并阻断波曲河,其后又沿波曲河迅猛下泄直到友谊桥,全长20 km。由于一路上有两岸崩塌、滑坡物质补给,在友谊桥处泥石流流体“龙头”雍高达25 m,比洪峰水位高出8 m,而泥石流运动层厚度可能

在4~10 m;再流到尼泊尔的逊科西水电站,全程又延长30 km,泥石流在此形成堆积段。全河段泥石流历时55 min,整个河段泥石流平均流速为35.4 km/h。据当地老乡反映,泥石流发生时,有巨大声响和震动,势如地震,河谷中烟雾弥漫,散发土腥味,洪流中巨石和部分直立的树木在河谷中流动,不见水体,20~30 m的水头似一堵高墙,来势凶猛。

据国外报导<sup>[2,6,13-15]</sup>,第四纪晚更新世地球上最大的洪水是中亚的库那(kural)、楚雅(Chuya)以及北美的密苏拉(Missoula)洪水,均因冰川阻塞湖发生溃坝而形成大洪水。密苏拉湖是在大约13 000 a前由科迪勒拉(Cordilleran)大冰盖向南延伸到爱达荷州狭长地带,形成阻塞克拉克福河的大冰坝,湖深700 m,蓄水 $2.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

国外关于冰川和冰碛堰塞湖溃坝堆积的研究以北美开展较早,但北美的冰川区其山势之陡峻不及青藏高原,其大陆冰盖区主要占据平原地区,故其溃坝堆积物质粒径较中国西部为小,其基本特点类似冰水扇堆积,与中国西部冰碛物对比其累积曲线,除百分比分配更多分散外,曲线形态类似,而其冰水平原物质的累积曲线则更为相似,但颗粒粒径比较小, $\phi$ 值多在4~5<sup>[16]</sup>(图2),而中国西部同类堆积的 $\phi$ 值可达8~9<sup>[4,7]</sup>。在横剖面上冰湖溃坝堆积呈现清晰的斜交层理,最大砾石粒径在15 cm $\pm$ ,其余多在5~10 cm,也显示溃坝堆积剖面上砾石粒径的特点。

上述冰湖溃决后沉积作用,反映的是山麓或平原区情况,高大山区则完全不同。1981年西藏章藏布冰湖溃决在冰碛台地上形成了清晰的泄洪道和冲积扇,冰湖溃决时洪水的冲刷性很强,所以在泄洪道很难见到溃坝堆积。溃坝堆积体剖面则见于波曲河下游普尔坪桥址,剖面高7.4 m,堆积厚度约10 m,大砾石集中在剖面顶部,基本水平排列,长轴平行流向,扁平面略倾向上游,有时是叠瓦状<sup>[7]</sup>。

在章藏布沟下游的弯道凸岸开始出现巨石组成的泥石流天然堤堆积,没有细粒物质参与,这是动力分选的结果。泥石流前进中不断有巨石向两侧抛出。此处的巨砾天然堤延伸约70 m,砾石平均直径0.57 m,最大的10块巨砾长轴平均4.65 m。天然堤(侧脊堤)在大、小泥石流中均可发育。天然堤的存在及其良好延续性在一定程度上证明泥石流在较宽的河道流动的均匀性和连续性<sup>[7]</sup>。

巨砾心滩是泥石流龙头堆积的,组成混杂,没有分选。巨砾心滩面积可大可小,大的可达200 m $\times$

80 m $\times$ 6 m,最大10块巨砾平均粒径达5.4 m,其中最大的一块为17.7 m $\times$ 11.3 m $\times$ 6.7 m,据查此石块距原地已3.2 km。这与在冰川溃坝堆积所见是相似的。

Lord and Kehew<sup>[16]</sup>对位于加拿大萨斯喀彻温省东南部和美国北达科他州西北部的Regina湖、Arcola湖和Souris湖3个冰湖溃坝后的堆积体进行了报道。3个溃坝堆积体形成在11 700 a或11 300 a以前。共发现了20多处冰湖溃坝堆积,其中一半以上平面上沿河一侧呈“吊坠”形态,另一半的堆积体分布在顺直河道的凹处,有时与滑坡伴生。在泄洪通道里的溃坝堆积体大小一致,均为2 km长,0.5 km宽,20 m厚。主要成分为冰碛物和洪水侵蚀碎屑物。这些冰湖溃坝堆积体分选极差,同源性很强,有杂基构造,堆积体表面的大砾石比较分散,一些粗碎屑有叠瓦构造。有两个堆积体在下游末端位置见到不清晰的板状交错层理,表明有较多的分选作用,在垂向上粒径也有明显差异,隐约有水平层状。堆积体中最大的砾石直径达3 m,直径1 m的砾石非常普遍,堆积物的最大粒径向下游变小。从以上可知, Lord and Kehew<sup>[16]</sup>等虽对溃坝堆积的沉积特征描

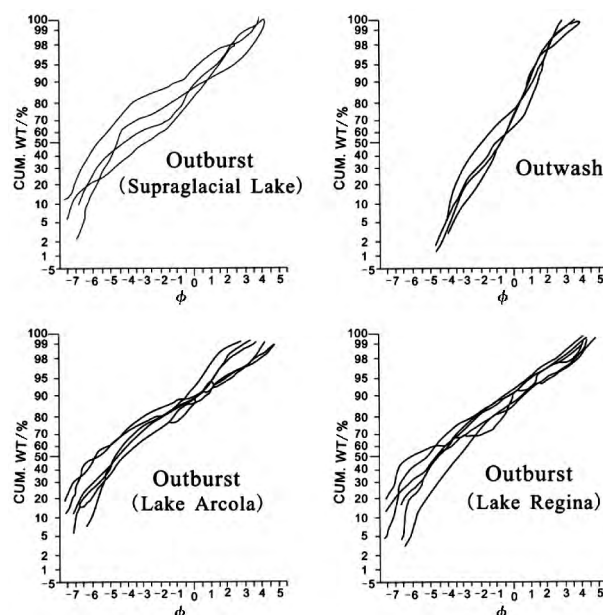


图2 加拿大萨斯喀彻温湖溃坝堆积物与冰水平原物质的累积概率曲线,圆括号内名字代表冰湖溃坝堆积的来源(引自 Lord and Kehew<sup>[16]</sup>)

Fig. 2 Accumulative possibility curve of dammed-lake outburst deposits and glacio-fluvial deposit in Saskatchewan Lake, Canada.

Sources of the glacial dammed-lake outburst deposits are indicated in the brackets (from Lord and Kehew<sup>[16]</sup>)

述不够详实,但与喜马拉雅山区冰湖溃堆积确有很大不同,但与下文将要提到的我国金沙江上游的溃坝堆积也有相同之处,如平面上是“吊坠状”等。

## 2 滑坡等块体运动造成的堰塞湖及其溃坝堆积

近年来基于地震导致的滑坡堰塞湖已有较多报道<sup>[3,17]</sup>,但基本未涉及溃坝堆积相研究。而关于滑坡堰塞湖,自2008年“5·12”四川汶川地震造成几十个堰塞湖被报道以后,尤其是唐家山大滑坡造成的唐家山堰塞湖经人工疏导溃坝等,都曾引起国内高度关注<sup>[18-20]</sup>。堰塞湖已是历次大地震中不可或缺的衍生物。地震引起的崩塌、崩滑、滑坡、泥石流造成堰塞湖,在地质史或中国历史上不乏典型实例,其中最有名的应是在川西一带广泛分布的昔格达层( $N_2$ ),这一套沉积就是著名的堰塞湖湖相地层<sup>[21-22]</sup>。此外,西安秦岭翠华山的中元古界变质杂岩山崩就临近秦岭山麓大断层,崩塌体达 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,造成了天池堰塞湖<sup>[23]</sup>。虽历史上也说此崩塌与公元前780年地震有关,但较大的地形性降水、陡直的临空面以及坚硬多裂隙的岩性也是易发生山崩的原因。1786年6月四川泸定的7.5级地震诱发大型滑坡,使大渡河上形成堰塞湖,溃坝时死亡10万余人。1933-08-15四川叠溪因地震造成山崩,造成岷江上游3处滑坡堵塞成湖,溃坝后同样损失惨重(图3)。近期如2000-04-09西藏易贡藏布支沟扎木弄巴发生特大滑坡, $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的崩塌体堵塞易贡藏布形成高130 m、长1500 m的堰塞坝;6月10日局部溃决,水头高55.36 m,最大洪峰流量达 $12.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

以上事例说明多种混杂堆积过程与堰塞湖有不解之缘。溃坝堆积的沉积特征与环境迄今少有报导。对北川唐家山溃坝堆积体以及川西彭州市鸭子河上游银厂沟西侧高达70 m堆积台地剖面作初步研究,发现两者从平面沉积特征到剖面上的层面结构构造,均具有良好的可比性,各为一新一老的溃坝堆积。此后又得知金沙江上游雪隆囊滑坡堰塞湖溃坝堆积的资料<sup>1)</sup>,更因2013年5月作者等在岷江上游漳腊川上至分水岭河段见到大规模溃坝堆积(已构成岷江上游地三级阶地)以及2013年对岷江源区的现场观察,由此得到对滑坡溃坝堆积的初步认识。

1) 由中国地质大学陈剑提供(2012)。

### 2.1 滑坡堰塞坝、湖相与溃坝堆积的“三位一体”全方位展示的雪隆囊溃坝堆积

雪隆囊滑坡位于金沙江中咱-巴塘河段右岸的雪隆囊村附近(图4)。滑坡体体积估计为 $2.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,滑坡体物质组成主要为砾石堆积,最大砾石大小约 $4 \times 3 \times 2 \text{ m}^3$ 。右岸主滑坡体的前缘堆积平台高出河水位约82 m,左岸残留有过江的滑坡堆积体,顶部高出河水约90 m。滑坡堆积体的上游一侧发育厚层(约25 m)的湖相沉积物,表明此滑坡在历史上曾经形成过滑坡坝并堰塞金沙江。此处堆积特征无论从宏观或从中、微观几乎是前述银厂沟溃坝堆积的再现。宏观上全剖面呈粗层、细层相间,这种韵律在残留微相和与滑坡体过渡处则更清晰(图6)。



A: 1933年崩塌处及巨型崩积锥; B: 堰塞湖叠溪下湖;  
C: 堰塞湖叠溪上湖

图3 1933年叠溪地震引起崩塌造成堰塞湖

Fig. 3 The landslide-dammed-lakes caused by Diexi Earthquake in 1933

在右岸滑坡体的下游一侧发育一长约1.7 km的溃坝堆积体,其平面形态上呈一长条“吊坠”状,即堆积体靠近上游处较宽(最宽处达250 m),靠近下游处较窄(宽度约80~100 m)。

从溃坝堆积体的物质组成及岩性特征看:靠近坝体处主要为块石堆积,夹砂砾,块石粒径较粗,最大粒径达 $1.5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,多数粒径为 $0.5 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ (占50%),磨圆度差,呈棱角状,其岩性主要为灰色片岩,表明其物源主要来自于近源的滑坡坝堆积体,属于坝体残留微相(图4、5),在出露的纵剖面上可以看到明显的叠瓦构造。在块石堆积层上可见覆盖有0.5~1 m厚的细砂层,应是回水堆积物。堆积体中间位置为块石堆积与细粒层互层,岩性较为复杂,主要为片岩(70%)、花岗岩(20%)。



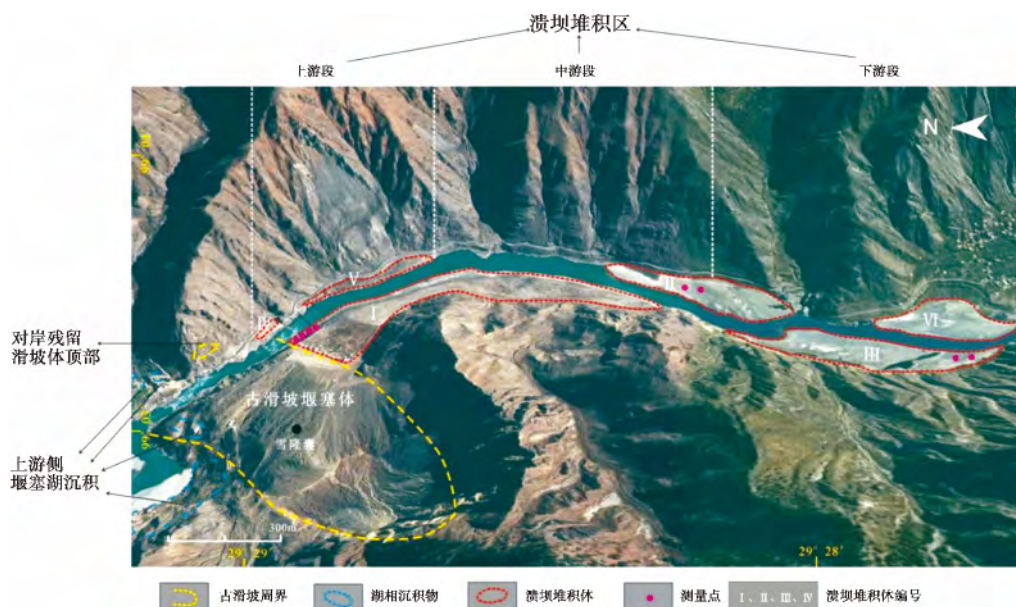


图4 金沙江上游芒康县雪隆囊溃坝堆积体分布(据陈剑图改)

Fig.4 The location of Xuelongnang dammed-lake outburst deposits at the upstream of Jinsha River

和其他岩性砾石(10%),有一定磨圆,呈次棱角—次磨圆状,块石最大粒径达 $0.6\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ ,多数粒径为 $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ (占50%)。堆积体下游位置(图4)为块石堆积夹细砂,岩性复杂,有片岩、花岗岩、灰岩、石英岩、砂岩等,磨圆度较好。上游段和下游段的沉积物粒度累积曲线与前述北美实例相比,其砂粒径含量较高、较集中(图6)不像前者比较分散。

堆积体在垂向剖面上靠上游处较厚,厚约15 m。可以看到明显的石线构造,且不连续砾石层向下游层次增多(图5),砾石直径减小,但横向间并不接触,多以个体存在。如前所述,推测多层次砾石层互层形成的原因是溃坝时多次洪峰所致,一次洪峰波动代表一个旋回,也可以据砾石层与砂砾层的旋回次数来判断溃坝造成的洪峰次数。照此推断,前述四川彭州银厂沟剖面系一巨型堰塞湖的溃坝堆积,溃坝洪峰多达几十次,而雪隆囊滑坡堰塞湖推测只有5次左右(剖面上可见3次堆积韵律层)。

雪隆囊溃坝堆积体经后期河流冲刷侵蚀仍残留4处,其中I号堆积体(图5)最大厚度约15 m,依次向下游堆积体减薄(厚5 m或 $2 \sim 5\text{ m}$ ),并保存在谷侧基岩之上,此处堆积层多粗砾并与细砾互层且出现倾向下流的斜层理,倾角 $5^\circ$ 左右(图9),一般的倾角 $\angle 10^\circ \pm$ 。中段砾石最大长轴约0.7 m,下段最大长轴约0.3 m,砾石排列呈扁平面向上倾斜的叠瓦构造,倾角达 $30^\circ \sim 45^\circ$ ,这大大超过正常河床相

倾角,后者仅 $15^\circ \sim 20^\circ \pm$ ,已接近泥石流堆积特征<sup>[12]</sup>。另一沉积特征是发育良好延伸性,很好的粗、细互层,有韵律感,层内虽分选不好,但整齐均一,缺少山区河流堆积中最常见的砂或砾石透镜体(狭窄沟道的产物),层次(理)面在上端略列向下游倾斜,而在下游段近似水平,与在四川彭州所见剖面一样有支撑——叠置结构和叠瓦、杂基构造,缺乏比较成熟的分选机制。

必须指出,在I号堆积体中有一厚5 m、长10 m的层理已经被扰乱粉砂粘土层相层(图7 8),右侧湖相层近直立,而左侧湖相层理向下游倾斜,这应是溃决时上游早已存在的湖相层被溃决激流翻动成块状向下游搬运并产生翻滚,但搬运距离很近(图8)。这是溃坝堆积的最好证据之一,显示了坝

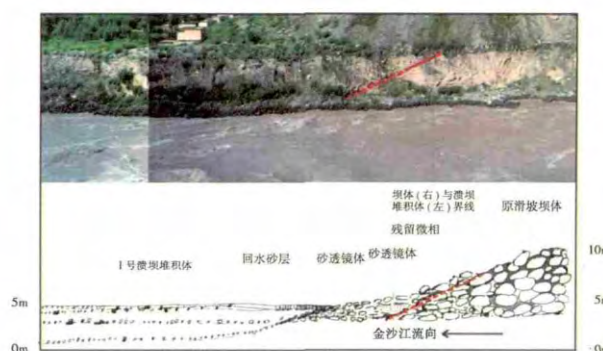


图5 雪隆囊溃坝堆积体剖面照片及示意图(照片据陈剑)

Fig.5 The profile diagram of Xuelongnang dammed-lake outburst deposits

体-上游湖相沉积-下游溃坝堆积“三位一体”的客观存在, 尽管时间上有先后。同时, 此湖相块体夹于两层溃坝堆积之间, 其分层标志十分清晰, 表示至少有两次巨大洪峰。

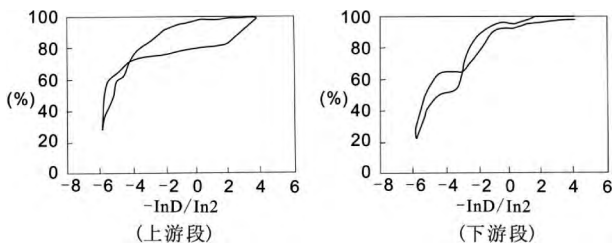


图6 金沙江上游芒康县雪隆囊溃坝堆积之累积曲线(据陈剑)

Fig.6 The accumulation curve of Xuelongnang dammed-lake outburst deposits

## 2.2 彭州鸭子河上游银厂沟剖面溃坝堆积的剖面结构、构造特征

### 2.2.1 剖面宏观结构特征

作者在前述中特别提到历史上溃坝的水体体积之大、之深(700 m), 以及溃坝时水头之高(55.36 m), 就是为了说明银厂沟西台地溃坝堆积体厚度达到70 m(图10)的剖面<sup>1)</sup>从上到下(未见底)有35个砾石层与砂砾层的韵律层。这是一组具有块状层理、无明显粒序递变、水平延伸良好、垂直递变规则的弱分选沉积剖面, 各层面均平坦延伸, 也无明显间断, 物源方向来自西部龙门山区, 故巨砾在剖面左侧(上游方向)较大(长轴4~5 m), 而右侧较小(长轴2~3 m), 几乎都是散在似层面的部位上, 层之间是由较小砾石和细砾粗砂构成杂基状的厚层(厚7~8 m)砂砾层。对比各种扇形地沉积类型之特征后, 发现整个剖面均缺少砾或砂的透镜体, 而这本是洪积扇形地面上最常见的沟道洼地充填的产物, 是多次

重复堆积的体现。说明此堆积发育时缺少正常的纵向沟道, 此厚层剖面也不具多次堆积经历, 故有可能是一次性堆积。然而70 m的厚度则意味着曾有一次远远大于唐家山堰塞湖的溃坝堆积过程。

据剖面整体特征推测此剖面应是前文所列各亚相中的中游(扇中)亚相或再偏向下流一点。但绝不是下游亚相, 因其中含有很多巨砾。严格地说, 此剖面虽形成在气下环境, 但整个剖面在沉积过程中没有像一般气下扇形地那样有多次中断、多次堆积。从动力和沉积特征看, 是一种很特殊的产物, 既不同于任何山区洪流或河流堆积(有众多不同性质的透镜体), 也不同于冲积扇的各亚相特征, 更不同于作为两相流的泥石流, 是瞬间的大量的洪水堆积而不是浆体作为搬运介质的泥石流堆积。然而从此剖面沉积结构等细部看, 又与山区河流和泥石流堆积有类似特征, 这些特征均说明其大规模洪水暴发的突发性。

### 2.2.2 剖面细部沉积特征

#### 1. 叠瓦构造

无论是整个剖面上的分散的砾石排列或在类似泥石流底部的石线构造中都可看到典型的叠瓦构造。所有砾石ab面均倾向上游。

#### 2. 石线构造

在宏观剖面上有明显的石线构造, 或是在中观上直径30 cm的扁平石块也排列成石线, 砾石间也显示明显的孔洞。

#### 3. 孔洞构造

巨砾间有很大(>10 cm)孔洞, 洞中填有黏土质物质。但细粒物质并未完全填满空洞, 是快速堆积的表现。

#### 4. 充填构造和定向构造

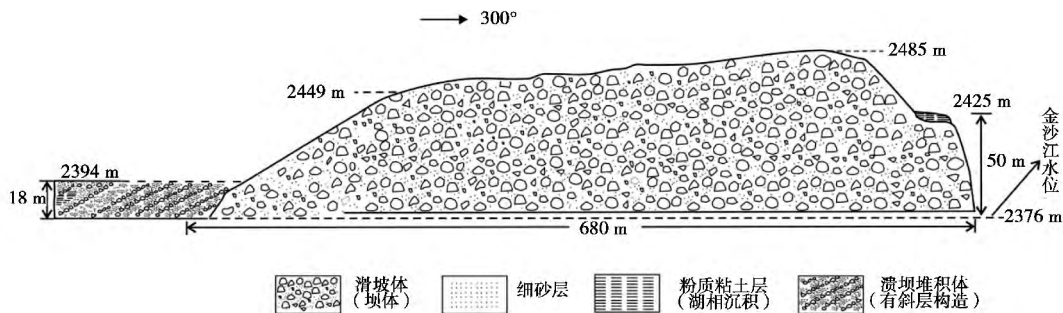


图7 雪隆囊滑坡坝、上游湖相沉积及下游溃坝堆积的横剖面示意图(据陈剑, 有修改)

Fig.7 The cross section diagram of Xuelongnang landslide dam, lacustrine deposit upstream and dammed-lake outburst deposits downstream

1) 该剖面由崔鹏发现并认为溃坝堆积性质, 经多方考察对比后作确认。





图8 I号堆积体中上游段,溃坝堆积中见巨型湖相粉砂粘土层(A),其上覆盖后期堆积的溃坝堆积体(B),与下层溃坝堆积体(C)之间有明显间隔(D)(陈剑摄)

Fig. 8 Mid-upstream of No. 1 deposit body, huge lacustrine silt-clay layer (A) is in the middle of the dammed-lake outburst deposit body. Above the silt-clay layer is outburst deposit body formed later (B), between which and the underneath outburst deposit body (C) is an distinct gap (D) (陈剑摄)

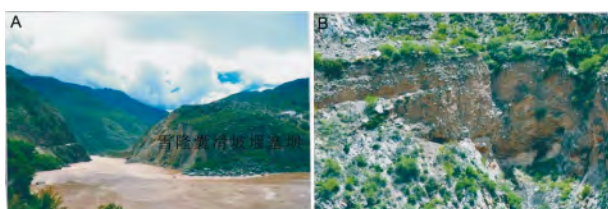


图9 A: 雪隆囊滑坡堰塞坝,前为金沙江(陈剑摄)  
B: I号堆积体上段微相堆积特征(左侧粗细相间,斜层构造,倾角 $\angle 5^\circ$ )(陈剑摄)

Fig. 9 A: Dam formed by Xuelongnang landslide (the front is Jinsha River); B: Micro-facies deposit characteristics of the upper part of No. 1 deposit body (Alternation of coarse and fine particles in the left, inclined bedding formation with an angle of  $\angle 5^\circ$ ) (陈剑摄)

部分巨石间大空隙被即时冲入的粗大砾石所填充,而在充填时造成前后砾石的定向排列。

### 5. 杂基结构

30 cm 以上的砾石悬浮于砂砾杂基之中,从细部看无任何进一步的分选,故整个剖面属于无分选—弱分选性质,是快速堆积的结果。故从总体特征看属混杂堆积相无疑。

### 6. 块体构造

从剖面中可以看到每一层水平展延性很好的细粒层上部都有一水平展布的粗砾石层,看似韵律层,一粗一细,总体厚约1 m 左右。此所谓细粒层是块状结构,并无分选,而所谓的粗粒层(砾石层)则呈现一系列上述类似泥石流堆积特征。从全剖面宏观特征看它是洪水堆积,有大规模粗糙的分选机制,



E. 白水河剖面

图10 白水河剖面结构与构造特征(上)及唐家山溃坝堆积现场(下)

Fig. 10 The structure characteristics of Baishui Riviver sedimentary section and Tangjiashan dammed-lake outburst deposits

而从中、微观看它又具备泥石流堆积特征,反映堆积过程的快速杂乱,这两大特征的共存,唯有“溃坝堆积”解释最贴切。上述粗、细层构成的韵律组应是一次洪峰留下的痕迹,推测在一次洪峰减退过程中,上游物源减少,而减退的洪峰带走较细的物质后,在河床上留下粗粒层,并如此多次重复。

应该指出,剖面上水平层理仅有很小的倾向下游的倾角( $2^\circ \pm$ ),对比雪隆囊和北美同类堆积,斜层倾角主要决定于溃坝处的地形和距溃坝处的距离。若倾角小,距离较远且地形更趋水平。

### 2.3 现代溃坝堆积的平面展布与微相划分——北川唐家山

唐家山堰塞湖位于四川省北川县原县城上游6 km 处之通口河上,该河在下游青莲镇附近汇入涪江。该滑坡堰塞坝长803.4 m,宽611.8 m,相对高82.6~124.6 m,体积约 $2\ 037.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,最大蓄水量为 $3.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。四川北川唐家山溃坝堆积体从溃坝处到苦竹坝发电站沿线约3 km 河段,河床平整,平面上从上游到下游可以把溃坝堆积划分出坝体

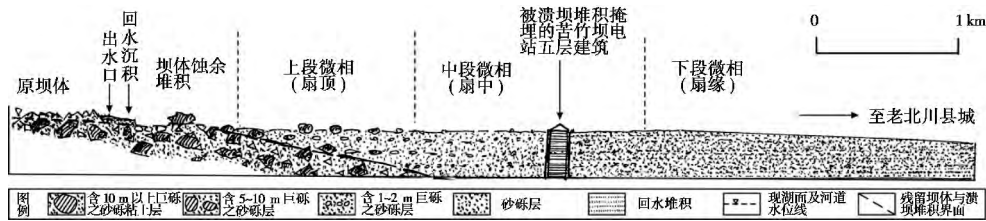


图 11 堰塞湖溃坝堆积体剖面示意图

Fig. 11 The profile diagram of Tangjiashan dammed-lake outburst deposits

残余微相、回水微相、上游(相当于扇形地扇顶部分)微相、中游(相当于扇中)微相,以及下游(相当于扇缘)微相。实际上,就上、中、下游3段划分,整个就类似于一个沿河道而被拉长了的扇形地堆积模式。沉积相上相似之处是除紧贴坝体开口下侧两岸有回水微相外,整个河道横向上并无沉积微相差别。因为,溃坝时洪水在河道上是完全满灌的(虽然中心主流线和两侧流速及沉积物肯定有所差别),所以看起来沉积物大小在横向上差别不显,但沿纵向方向,在巨砾分布上却差异明显。现以雪隆囊村和岷江源区研究区绘制图 12、图 13。

唐家山现代溃坝堆积平面微相类型及沉积结构特征:

1. 坝体残留微相,在地貌上是多个巨砾心滩并列,顶部可见未被巨大洪水冲走的巨砾若干,最大巨砾长 8 m,宽 4 m,高 4 m,体积为  $128 \text{ m}^3$ 。重达 300 t。另若干巨砾为  $4 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 36 \text{ m}^3$ ,几乎呈一条直线横列在河床之巨砾砾滩顶端。另一特点是巨砾密度大,在  $12 \text{ m} \times 42 \text{ m} = 504 \text{ m}^2$  面积上有 2 m 以上巨砾 20 块,因洪水无力搬运此等巨砾,故砾滩表面砾石分选差。在金沙江上游巴塘附近的雪隆囊也有类似特征,只是砾石直径略小而已。

2. 回水微相,早期溃坝洪水水位较高,在坝外两侧均产生回水,堆积了厚度不一,但分选良好层理清晰的以砂和细砾为主的砂砾层,厚约 10~20 cm 左

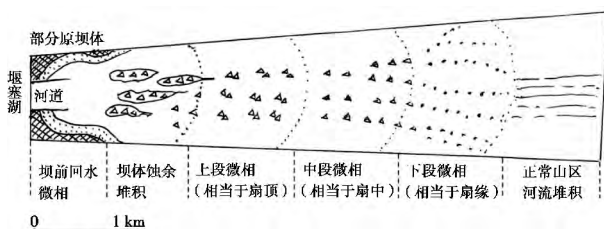


图 12 堰塞湖溃坝堆积微相平面分布示意图

Fig. 12 The plane distribution of sedimentary micro-facies of Tangjiashan dammed-lake outburst deposits

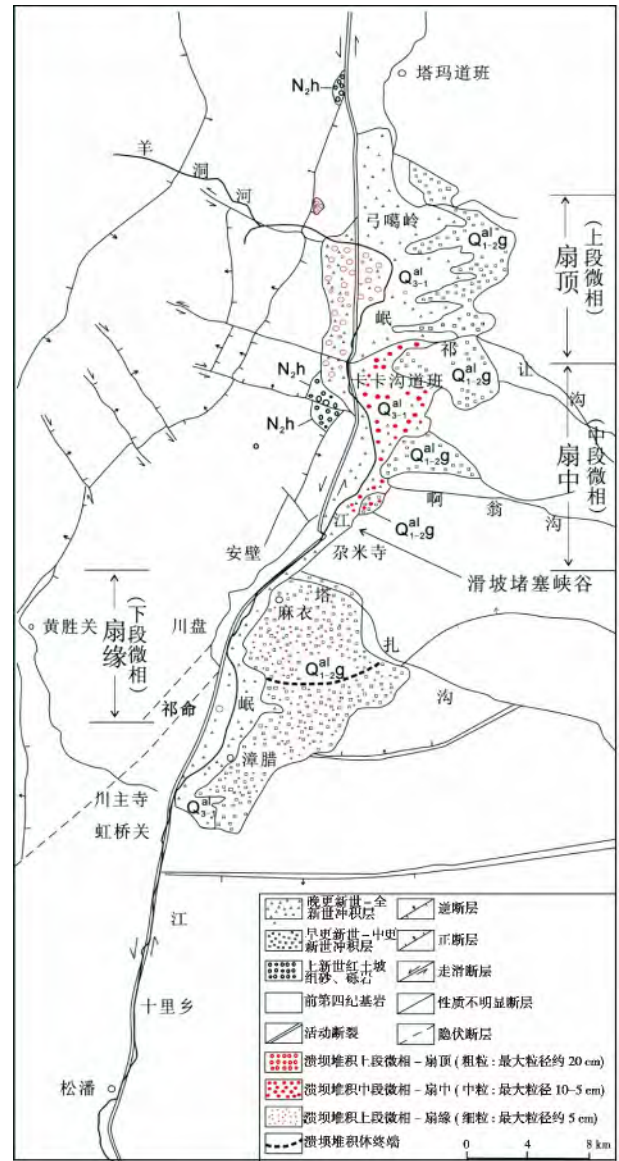


图 13 岷江源区溃坝堆积三种微相分布图

(原底图据周荣军等<sup>[29]</sup>)Fig. 13 Distribution of three micro-facies of dammed-lake outburst deposit in the headwaters of Min River(modified from article<sup>[29]</sup>)

右 标志着水位的早期落差。

3. 上游(扇顶)微相,往下距残留体约 3 km 处,



砾滩上巨砾迅速减少,体积变小。每平方米不足一块,且巨砾有“抱团”现象,即若干块集中在一起,有被放弃的分叉沟道存在,说明河床糙度仍可干扰流速。砾滩表面除少量巨砾成团外,分选比较好,基本上被粒径几厘米至几十厘米的砾石均匀覆盖,只看到很少的砂体。

4. 中游(扇中)微相,再往下约2 km,距离原坝处约5 km左右,即苦竹坝电站周围,砾滩表面很平整,基本不见有1 m以上的巨砾,大多在几十厘米至1 m,分叉沟道比上游微相段增多,这应是溃坝后期洪水位降低后的产物。在苦竹坝电站被掩埋处原建有五层楼,被溃坝沉积掩埋,只剩楼顶,估计沉积厚度在10~12 m,这也基本反映了当时的水头应在此高度以上。但与本文前面介绍历史上堰塞湖深数百米及易贡藏布溃决洪水水头达55 m相比,唐家山溃决洪水之规模不能算大。

5. 下游(扇缘)微相,距残坝5 km以下,河床渐变为以砂为主的砂砾滩。沟道分叉更多,基本没有数十厘米直径的砾石,大多小于10 cm,有一定数量的砾石透镜状洼地显现,如北川县城外河滩所见。

#### 2.4 溃坝堆积之宏观平面和剖面展现——岷江源区

岷江上游也是一个很典型的堰塞湖——湖相沉积和溃坝堆积三位一体的地区,如叠溪现存的上湖和下湖(图3)就是1933年因地震而引起的崩塌体堵塞而成,湖边三级阶地外侧就发育了此前更老的堰塞湖相沉积,类似的湖相层和现存的堰塞湖多处可见(沙湾边)<sup>[24-26]</sup>。

岷江源及上游区自弓嘎岭附近向南到川主寺——虹桥关,全长约30 km,岷江上游三级堆积阶地,相对高25~30 m,以前都看成是流水堆积阶地<sup>[27-28]</sup>,其实都是大规模的溃坝堆积(图13),并从平面上展示出溃坝堆积从粗到细的变化,如从弓嘎岭到卡卡沟长10 km余(弓嘎岭以上岷江源头支流之一羊洞河往上还有一定距离),为分选比较均一的,但磨圆度不好的砾石层,显示粗略的层理,但砾石大小比较均一,其中最大者不超过50 cm,整个剖面不见任何大于此粒径的单个巨砾,也不发育透镜体(这应是山区河流堆积中最常见的堆积体),在卡卡沟以上范围内基本都如此,作者将其划分为粗粒溃坝堆积。从卡卡沟到杂米寺,长约10 km,最大粒径已减少到30 cm左右,为中粒溃坝堆积(图14)段,高十余米的剖面中只有个别直径30 cm左右的砾石,其余皆为小于30 cm至细砾。到杂米寺以下麻衣附近,往下约3 km,为此溃坝堆积的终端(图14)。第三级阶地均以小于5 cm的砾石及砂粒为主,因颗粒变细易于分选,故层次也更为清晰。此处所显示的沉积物粒度空间分布规律就是图13所绘唐家山溃坝堆积平面图式的重现。粗砾段相当于扇顶部位,而扇中和扇缘即相当于中砾分布处,而扇外的细砾、粉砂级则散布在虹桥关峡谷以下西侧同级阶地面上(图14)。据实测每往下游5 km,最大粒径约减少10 cm。显示溃坝洪水在宽阔水道中,随水道降低,势能减弱而仍可携带更小砾径的石块前进。

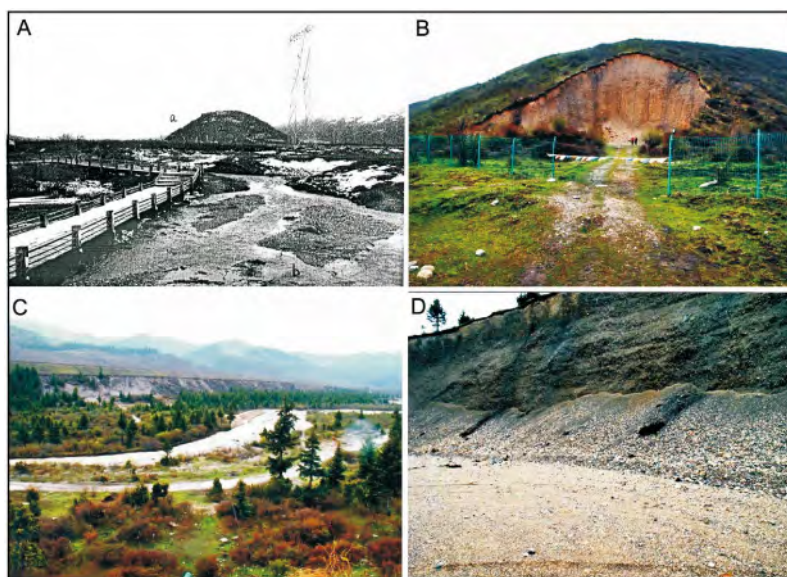


图14 岷江源区溃坝堆积地貌与沉积特征

Fig. 14 The geomorphological and sedimentary characteristics in the headwaters of Min River

A: 附近弓嘎岭主峰4 626 m,岷江源之一羊洞河方向,弓嘎岭岷江源(3 500 m)砾石层小丘(a)(远景)为粗粒溃坝堆积体,图中即岷江源水流(b); B: 前图小丘剖面近景,粗粒溃坝堆积之贡嘎岭砾石层,剖面高14 m,粒径较均一; C: 卡卡沟南、西大型砂场之砾石层剖面,有层次、分选,砾石直径相近无巨砾,中粗粒溃坝堆积(3 200 m); D: 岷江东岸麻衣附近厚层大面积次有序堆积—较细粒溃坝堆积。C、D皆为T3。

### 3 块体运动堰塞坝溃坝堆积的主要特征

由上可知,溃坝堆积有一些最显著特点。其一:不论粒径大小,各堆积区段皆十分均一,绝对没有“出格”大的砾石出现,这与一般山区河流堆积有极显著的差别,说明有巨大流动水体在进行快速分选作用,即同时得到分选的颗粒粒径区间比较大,分选机制不够细致。同时,与湖相层有显著差别。无论粒径或层理都没有可比性,但远视或粗略观测都会有与湖相“类似”的感觉。

其二:在各大剖面剖面上,看不到山区河流堆积或扇形地堆积中最为常见的砂或砾透镜体构造。因其只是在分叉河道中因河道改道被遗弃后的不同粒径物质的填充物,这在堰塞湖溃决的巨大洪流中,因洪水已溢满整个通道,不可能只在沟底才会出现的沟道填充物。

其三:可以说既有分选也无分选。巨大、短暂而快速的溃坝洪水不同区段只对一定幅度以内的不同粒径砂砾进行分选,可以称其为“粗放式”分选,如前述岷江源区不同段落之堆积状况,上段粒径从 20 cm 到细砾(1 cm $\pm$ )都在同一地段,中段 10 cm—砂砾,下段 5 cm—砂砾等皆堆在同一地段,再大的没有,再小的也不多。把它和河床相、河漫滩相和湖相,即使是湖三角洲相相比,差异很大,它们都是长时间均一的分选,可称之为“精细式”分选。

其四:溃坝堆积由于是粗放式分选,所以它就同时包含了其内部还没有分选的成分,因而在中观尺度上保留了大量分选不好的杂基结构,一定粒径以下(如 5 cm 以下)都是大小混杂,有空洞和空洞填充构造、叠瓦构造,但缺少宏观的叠瓦构造(如泥石流堆积)<sup>[12]</sup>,总体上可能底部也不存在拖曳或滑动推移过程,而可能大都是悬移过程,所以整个溃坝堆积的不同地段之粒径大小都在一定级别的范围以内,即使在有斜层构造时大致如此<sup>[16]</sup>,没有局部变化。铲平河床,使被充水的河谷成为一个相对均一的流体,沿河只有系统的水量、水深、流速的变化。故从总体看是一个大型粒径渐变的堆积体,相对滑坡体、崩塌体或泥石流扇形体而言,其体积、厚度更大更均一。彭州鸭子河上游剖面出露厚度 30 m 以上,岷江上游麻衣等剖面高 15~20 m……整个剖面从下到上结构完全一致,这在其他混杂堆积剖面上

都是未见的。即使在厚达百米的昔格达湖相层中有时也只含有来自西侧山坡的泥石流透镜体。溃坝堆积物里几乎没有粉砂黏土或含量极少也是一个重要特征。

以上所述都是与其他混杂沉积类型相区别的重要标志。总之,远看似湖相沉积(即宏观水平层理相似),近看似河流沉积(但规模太大,远超一般山区河流沉积的不均一性),细看似泥石流堆积(细部结构很相似),但远、近、细三结合,即看出是溃坝堆积,目前研究表明由块体运动(滑坡、崩塌、泥石流等)造成的坝体溃坝时的堆积物最具代表性。

### 4 结语

目前关于堰塞湖溃坝堆积的研究很少,特别是沉积相方面,可以说这是一个新近被认识的沉积类型,本文只是一个初步的探讨,极待读者批评指正。由上述可见,堰塞湖溃坝流体是介于某些洪水、河流和泥石流之间的一种流体,应是一种高密度流;是水为搬运介质而非浆体,具有非牛顿流体特点,会导致沉积物同时具有河流和泥石流沉积物的特点。可以说是在洪流中保留有局部泥石流特点,故在局部微观结构上会见到与泥石流沉积相似的叠瓦构造、石线构造等,也可见到河流沉积的板状交错层理。所以滑坡坝溃坝堆积会被误判成河流沉积,而冰湖溃坝堆积则多与冰碛物和冰水扇堆积难以区分。对于各种混杂堆积物之间的区分,则往往需要综合考虑其所在地貌部位、堆积体的整体构造及局部结构等<sup>[12]</sup>。如判断冰湖溃坝堆积可以在其上游寻找泄洪通道,冰湖溃决形成的泄洪通道在宽度、高深宽比值和不连续陡岸上特征明显,很容易与冰川融水形成的渠道相区别;而由于水动力条件不一样,冰湖溃坝堆积与冰水扇堆积肯定也不一样,对冰湖溃坝堆积物和冰水扇堆积分别做粒度分析,两者的粒度累积曲线明显不同;判断滑坡坝溃坝堆积一般会有坝体残余微相和回水微相,如果有堰塞湖沉积则很易判别,如果是泥石流沉积则有明显的龙头堆积。此外,今后除了对溃坝堆积体的沉积特征进行更细致的研究外,今后还需要对溃坝堆积体方量、坝体方量、泄洪量以及水深等水力学进行定量分析,这可能有助于重建古溃坝堆积与溃决洪水的水文特征<sup>①</sup><sup>[30]</sup>和相应的沉积环境。

1) 陈剑,崔之久.金沙江上游雪隆囊左滑坡堰塞湖相溃坝堆积体的发现及其环境与灾害意义(未刊稿) 2014。

## 参考文献(References)

- [1] Carson B. Erosion and sedimentation processes in the Nepalese Himalaya [J]. Kathmandu: ICIMOD, 1985.
- [2] Evans S G. The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man-made and natural dams [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23: 385–387
- [3] Dai F C, Lee C F, Deng J H, et al. The 1786 earthquake triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, Southwestern China [J]. Geomorphology, 2005, 65(3–4): 205–221
- [4] Cui Peng, Ma Dongtao, Chen Ningsheng, et al. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(6): 621–627 [崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 621–627]
- [5] Costa J E. Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows [G// Baker V R, Kochel R C, and Patton P C, eds., Flood geomorphology. New York, John Wiley and Sons, Inc. 1987.
- [6] Cutler P M, Colgan P M, Mickelson D M. Sedimentologic evidence for outburst floods from the Laurentide Ice Sheet margin in Wisconsin, USA: implications for tunnel-channel formation [J]. Quaternary International, 2002, 90: 23–40
- [7] Xu Daoming. Characteristics of debris flow caused by outburst of glacial lakes on the Boqu River in Xizang, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987, 9(1): 23–34 [徐道明. 西藏波曲河冰湖溃决泥石流的形成与沉积特征 [J]. 冰川冻土, 1987, 9(1): 23–34]
- [8] Xu Daoming, Feng Qinghua. Dangerous glacial lake and outburst features in Xizan Himalayas [J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(3): 343–352 [徐道明, 冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征[J]. 地理学报, 1989, 44(3): 343–352]
- [9] Wang Xin, Liu Shiyin, Guo Wanqin, et al. Hazard assessment of moraine-dammed lake outburst floods in the Himalayas, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(7): 782–790 [王欣, 刘时银, 郭万钦, 等. 我国喜马拉雅山区冰碛湖溃决危险性评价[J]. 地理学报, 2009, 64(7): 782–790]
- [10] Li Yong, Densmore A L, Zhao Rongjun, et al. Late Cenozoic erosional thickness and flexural deflection along the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Acta Geological Sinica, 2005, 79(5): 608–615 [李勇, Densmore A L, 周荣军, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代剥蚀厚度与弹性挠曲模拟[J]. 地质学报, 2005, 79(5): 608–615]
- [11] Zhang Peizhen, Zhen Dewen, Yin Gongmin, et al. Discussion on Late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 5–13 [张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 5–13]
- [12] Cui Zhijiu et al. Diamicton and environment [M]. Hebei: Hebei Science and Technology Press, 2013. [崔之久, 等. 混杂堆积与环境[M]. 河北: 河北科技出版社, 2013.]
- [13] Baker V R. Paleohydrology and sedimentology of lake Missoula flooding in eastern Washington [J]. Geological Society of America Special Paper, 1973, 144: 79
- [14] Clayton L, Moran S R. Chronology of late Wisconsinan glaciation in middle North America [J]. Quaternary Science Reviews, 1982, 1: 55–82
- [15] Benna D I, Owen L A, Finkel R C. Pleistocene lake outburst floods and fan formation along the eastern Sierra Nevada, California: implications for the interpretation of intermontane lacustrine records [J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25: 2729–2748
- [16] Lord M L and Kehew A E. Sedimentology and paleohydrology of glacial lake outburst deposits in southeastern Saskatchewan and northwestern North Dakota [J]. Geological Society of America Bulletin, 1987, 99(5): 663–673
- [17] Wu Q L, Zhang P Z, Zhang H P, et al. Apalaeo-earthquake induced damming and bursting of Yellow River and the abnormal flood that destroyed Lajia relic (in Chinese) [J]. Sci China Ser D – Earth Sci, 2009, 39(8): 1148–1159 [吴庆龙, 张培震, 张会平, 等. 黄河上游积石峡古地震堰塞溃决事件与喇家遗址异常古洪水灾害[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2009, 39(8): 1148–1159]
- [18] Wang Guangqian, Zhong Deyu, Zhang Hongwu, et al. The numerical simulation of Tangjiashan dammed lake discharge process caused by Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(24): 3127–3133 [王光谦, 钟德钰, 张红武, 等. 汶川地震唐家山堰塞湖泄流过程的数值模拟[J]. 科学通报, 2008, 53(24): 3127–3133]
- [19] Fu Xudong, Liu Fan, Ma Hongbo, et al. Physically based simulation of the breaching of the Tangjiashan Quake Lake [J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2010, 50(12): 1910–1914 [傅旭东, 刘帆, 马宏博, 等. 基于物理模型的唐家山堰塞湖溃决过程模拟[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(12): 1910–1914]
- [20] Li Huzhang, Liu Songlin. The review of the successfully removing danger of Tangjiashan dammed lake [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(8): 15–18 [李虎章, 刘松林. 唐家山堰塞湖成功排险综述[J]. 水利水电技术, 2008, 39(8): 15–18]
- [21] Jiang Fuchu, Wu Xihao, Xiao Huaguo, et al. On the age of the Xigedaformation in Luding, Sichuan, and its Neotectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(1): 1–6 [蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 等. 四川泸定昔格达组时代及其新构造意义[J]. 地质学报, 1999, 73(1): 1–6]
- [22] Qian Fang, Xu Shujin, Chen Fubin, et al. Study on the paleomagnetism of the Xigeda formation [J]. Mountain Research, 1984, 2(4): 275–282 [钱方, 徐树金, 陈富斌, 等. 昔格达组磁性地层的研究[J]. 山地研究(现山地学报), 1984, 2(4): 275–282]
- [23] Nan Ling, Cui Zhijiu. The deposit characteristics of the paleo-avalanche landslide in Xi'an Cuihua Mountain and analysis of its generative process [J]. Mountain Research, 2000, 18(6): 502–507 [南凌, 崔之久. 西安翠华山古崩塌性滑坡体的沉积特征及其形成过程[J]. 山地学报, 2000, 18(6): 502–507]
- [24] Qian Hong, Zhou Rongjun, Ma Shenghao, et al. South Segment of Minjiang Fault and Diexi Earthquake in 1993 [J]. Earthquake Re-



- search in China, 1999, 15(4): 333–338 [钱洪, 周荣军, 马声浩, 等. 岷江断裂南段与 1933 年叠溪地震研究 [J]. 中国地震, 1999, 15(4): 333–338]
- [25] Wang Lansheng, Yang Lizheng, Wang Xiaoquan, et al. Discovery of huge ancient dammed lake on upstream of Minjiang River in Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2005, 32(1): 1–11 [王兰生, 杨立铮, 王小群, 等. 岷江叠溪古堰塞湖的发现 [J]. 成都理工大学: 自然科学版, 2005, 32(1): 1–11]
- [26] An Weiping, Zhao Jinquan, Yan Xiaobing, et al. Tectonic Deformation of Lacustrine sediments in Qiangyang on the Minjiang Fault zone and ancient earthquake [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(4): 980–988 [安卫平, 赵晋泉, 闫小兵, 等. 岷江断裂羌阳桥一带古堰塞湖相沉积及构造变形与古地震 [J]. 地震地质, 2008, 30(4): 980–988]
- [27] Yang Jingchun, Deng Tiangang, Wang Yuanmei, et al. The quaternary tectonic stress over the up-stream area of Min Jiang River in Sichuan and its relations to earthquakes [J]. Seismology and Geology, 1979, 1(3): 68–75 [杨景春, 邓天岗, 王元梅, 等. 岷江上游地区第四纪构造应力状态及其与地震的关系 [J]. 地震地质, 1979, 1(3): 68–75]
- [28] Zhao Xinlin, Deng Qidong, Chen Shefa. Ectonic geomorphology of the Minshan uplift in Western Sichuan, southwestern China [J]. Seismology and Geology, 1994, 16(4): 429–439 [赵小麟, 邓起东, 陈社发. 岷山隆起的构造地貌学研究 [J]. 地震地质, 1994, 16(4): 429–439]
- [29] Zhou Rongjun, Pu Xiaohong, He Yulin, et al. Recent activity of Minjiang fault zone, uplift of Minshan Block and their relationship with seismicity of Sichuan [J]. Seismology and Geology, 2000, 22(3): 285–294 [周荣军, 蒲晓虹, 何玉林, 等. 四川岷江断裂带北段的新活动、岷山断块的隆起及其与地震活动的关系 [J]. 地震地质, 2000, 22(3): 285–294]
- [30] Carrivick J L. Dam break-out burst flood propagation and transient hydraulics: a geosciences Perspective [J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(3–4): 338–355

## Discussion on Characteristics of Sedimentary Facies of Dammed-lakes Outburst Deposits

CUI Zhijiu<sup>1,2</sup> ZHANG Mei<sup>1</sup> CUI Peng<sup>3</sup> CHEN Jian<sup>4</sup> WEI Mingjian<sup>5</sup> CHEN Yixin<sup>1</sup> LI Chuanchuan<sup>1</sup>

(1. College of Urban and Environmental Sciences Peking University, Beijing 100871, China;

2. Shenzhen Graduate School Peking University, Shenzhen 518055, China;

3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

4. School of Engineering and Technology China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

5. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** According to their dam modes of origin, dammed-lakes outburst deposits can be divided into glacier-dammed-lakes and moraine-dammed-lakes, lava-dammed-lakes and mass movements (landslide, collapse, debris flow) – dammed-lakes. Furthermore, characteristics of sedimentary facies which are caused by mass movements are most representative. Our preliminary research and reference to others' work on mass movements-dammed-lakes outburst deposits of several typical regions (Xuelongnang, Yinchanggou, Tangjiashan and the source region of Minjiang) demonstrate that spreading areas of many accumulated body are enormous ranging from several square kilometers to dozens of square kilometers; section sizes are also massive with heights of dozens of meters; layers (beddings) and structures in the whole profile are homogeneous without oversized gravels. Microscopically, certain features of accumulated body are similar to debris flow such as current of higher density with water as transporting media. Microfacies of accumulation body can be divided into fanhead (upstream), middle fan (midstream) and fan fringe (downstream).

**Key words:** dammed-lakes outburst deposits; glouier-moranes; Volcanic pile; block movement accumulation; con-foundingdeposits